



Stratification hydrogéochimique et écoulements verticaux dans l'aquifère des calcaires de Beauce (France): Un système anthropisé à forte variabilité spatiale et temporelle

Nathalie Schnebelen, Emmanuel Ledoux, Ary Bruand, Gilles Creuzot

► To cite this version:

Nathalie Schnebelen, Emmanuel Ledoux, Ary Bruand, Gilles Creuzot. Stratification hydrogéochimique et écoulements verticaux dans l'aquifère des calcaires de Beauce (France): Un système anthropisé à forte variabilité spatiale et temporelle. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série IIa, Sciences de la terre et des planètes, 1999, 329, pp.421-428. 10.1016/S1251-8050(00)80066-X . insu-00860829

HAL Id: insu-00860829

<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00860829>

Submitted on 11 Sep 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Stratification hydrogéochemique et écoulements verticaux dans l'aquifère des calcaires de Beauce (France) : un système anthropisé à forte variabilité spatiale et temporelle

Hydrogeochemical stratification and vertical flows in the Beauce calcareous aquifer (France): a human-influenced system with strong spatial and temporal variability

Nathalie Schnebelen^{a,b}, Emmanuel Ledoux^b, Ary Bruand^a, Gilles Creuzot^c

^a Unité de sciences du sol-SESCPF, Inra, av. de la Pomme-de-Pin, BP 20619, 45160 Olivet cedex, France

^b Centre d'informatique géologique, ENSMP, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau, France

^c Service de l'eau et des milieux aquatiques, Diren Centre, 5 av. Buffon, BP 6407, 45064 La Source, France

(Reçu le 15 juillet 1999, accepté le 19 juillet 1999)

Abstract — Vertical profiles of temperatures and flow velocities, as well as water samples taken at different depths, reveal a hydrogeochemical stratification of the Beauce calcareous aquifer. This stratification, which is particularly well marked for the NO_3^- and Cl^- profiles, is related to the development of intensive agriculture. It presents a strong variability: (i) in space because of the aquifer's multi-layered structure and the presence of reducing levels, (ii) and in time due to the existence in the boreholes of a vertical flow, the direction of which depends on the periodic exploitation of the aquifer. (© 1999 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS.)

multi-layered aquifer / hydrogeochemical stratification / vertical flows / agriculture / France

Résumé — Des profils verticaux de températures et de vitesses d'écoulement, ainsi que des prélèvements d'eau réalisés à différentes profondeurs, révèlent une stratification hydrogéochemique de l'aquifère des calcaires de Beauce. Cette stratification, particulièrement nette pour les profils de NO_3^- et de Cl^- , est à relier au développement d'une agriculture intensive. Elle présente une forte variabilité : (i) spatiale, liée à la structure multicouche de l'aquifère et à l'existence de niveaux réducteurs ; (ii) temporelle, due à l'existence dans les forages d'un écoulement vertical, dont le sens est lié à l'exploitation périodique de l'aquifère. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

aquifère multicouche / stratification hydrogéochemique / mouvements verticaux / agriculture / France

Note présentée par Georges Pédro.

* Correspondance et tirés à part.
Nathalie.Snebelen@orleans.inra.fr

Abridged version

For the last five decades human activities have been at the origin of a significant evolution of the quality of both surface and ground water (Chéverry, 1998). We already know that aquifer geochemistry can vary vertically without any lithological variation or perturbation of human origin (Pulido-Bosch et al., 1998). The aim of this study is to show that when the lithology varies and when the aquifer is affected by human activities, the aquifer geochemistry is then highly variable.

The Beauce aquifer system (*figure 1*) is located in the southwest of the Paris Basin and covers about 9 000 km². It develops in lacustrine facies, with calcareous dominance, which formed from the Eocene to the Aquitanian (*figure 2a*). The lacustrine series, which reaches 190 m in thickness, lies on a substratum made up of an Eocene detritic formation and on a formation made of clay and flints. Piezometric maps show the existence of two main sub-catchments (Desprez and Mégrien, 1975; BRGM, 1995): the Seine sub-catchment in the northeast of the aquifer and the Loire sub-catchment in the southwest. The main characteristic of the aquifer is the very small regional hydraulic gradient (about 0.1 ‰).

The site of Villamblain (*figure 1*) has a surface area of 7 km² and is located in the southwest of the aquifer, in the western part of the Loire sub-catchment area. In this study area the formation, which is made of clays and flints and which constitutes the aquifer substratum, is between 15 and 25 m thick and the lacustrine series is about 60 m thick (Schnebelen et al., 1996). Upwards, the series is made up of four lithostratigraphic formations (*figure 2b*):

- the marly calcareous of the lacustrine Lutetian (Morancez Limestone);
- the limestone of the lacustrine Upper Stampian (Étampes Limestone);
- the sandy marls of the Lower Aquitanian (Gâtinais Molasse);
- the fissured limestone of the Upper Aquitanian (Pithiviers Calcareous).

The soils are shallow (King et al., 1999) and highly permeable (Ould Mohamed et al., 1997). The aquifer is free and the water table is located between 12 and 20 m depth. The transmissivity ranges from $5 \cdot 10^{-2}$ to $10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ and the storage coefficient ranges from 7 to 13 % (Gigot, 1973). The mean recharge is about 110 mm per year. Many pumps are present on the study area and are used for the irrigation of spring and summer crops.

Thermal and flow velocity profiles as well as water samples taken at different depths were carried out at different periods in eight agricultural boreholes. The thermal profiles allow location of water entering or leaving the boreholes (Jouanna, 1993). The flow velocity profiles enable the measurement of the downward and upward flow velocities (Xiang, 1995). The boreholes catch the whole aquifer thickness and allow a detailed study of the water quality variation with depth. The results presented concern the two boreholes F1 and F2, which

are representative of the vertical and lateral variations observed in the aquifer beneath the study area.

During the irrigation period, the different profiles which were obtained in borehole F1 (*figure 3*) reveal an important hydrogeochemical stratification of the aquifer: the upper part of the aquifer (Pithiviers Limestone) presents NO_3^- and Cl^- concentrations which are roughly greater than those recorded in the lower part (Étampes Limestone and Morancez Limestone). This hydrogeochemical stratification also exists, but is less pronounced, for other chemical elements such as Na^+ , K^+ and Ca^{2+} . The results also show a significant decrease in the NO_3^- and Cl^- concentrations passing over the sandy marls of the Gâtinais Molasse which thus constitute a partial hydraulic barrier.

Outwith the irrigation period, when the borehole is at rest, temperatures and flow velocity profiles, as well as the tracer tests and water samples taken at different depths, show the existence of an upward flow in the borehole. The lower part of the aquifer, which has an hydraulic head greater than that of the upper part, discharges into the upper part. This flow leads to an homogenisation of the chemical element concentrations (especially for NO_3^- and Cl^-) at the value of the deep horizon.

The hydrogeochemical stratification was also observed during the irrigation period in the borehole F2 (*figure 4*) which is located at 2.6 km from the borehole F1. However, the NO_3^- and Cl^- concentrations are much lower than those of borehole F1. These low concentrations are probably due to geological anomaly (marly facies of the Étampes Calcareous) and NO_3^- reduction processes at the bottom of the aquifer (*table II*). As for the borehole F1, an upward flow exists out off the irrigation period in the second borehole. However, it is not the Étampes Calcareous which present the highest hydraulic head here but underground water located in the deepest horizon.

In conclusion, our results show a significant hydrogeochemical stratification of the Beauce calcareous aquifer and both a spatial and temporal variability of this stratification. The stratification is partly explained by the structure and lithology of the aquifer, notably by the presence of an upper part which is free, of a semi-permeable layer and finally a semi-confined lower part. The hydrogeochemical composition of the upper part depends mainly on the composition of downward flows which are affected by agriculture especially with regard to the NO_3^- and Cl^- anions. The presence of reducing levels would reduce the concentration of NO_3^- with depth. However, the exploitation of this multi-layered aquifer induces vertical hydraulic head differences and hence rapid flows in the boreholes. These flows vary in time according to the production regime of the boreholes and can be at the origin of a gradient inversion for the NO_3^- and Cl^- anions. Similar observations have been already made by Avci (1994) and Lacombe et al. (1995).

1. Introduction

Depuis une cinquantaine d'années, les activités humaines sont à l'origine d'une importante évolution de la qualité des eaux superficielles et souterraines (Chéverry, 1998). C'est en particulier le cas des aquifères libres situés dans les régions d'agriculture intensive. On sait, par ailleurs, que la géochimie d'un aquifère peut varier significativement selon la profondeur, même en l'absence de variation lithologique et de perturbation d'origine humaine (Pulido-Bosch et al., 1998).

L'objectif de cette note est de montrer que, lorsque la lithologie varie et que l'aquifère est influencé par les activités humaines, la géochimie de l'aquifère est encore plus variable. Des données acquises récemment sur le système aquifère des calcaires de Beauce, dont la lithologie est hétérogène et qui se situe dans une région d'agriculture intensive, permettent de montrer à quel point la

géochimie des eaux peut varier dans l'espace, mais aussi dans le temps. On s'attachera à discuter comment de telles variations peuvent être expliquées en fonction des caractéristiques naturelles de l'aquifère et de la nature des perturbations introduites par l'homme.

2. L'aquifère des calcaires de Beauce

Le système aquifère de Beauce (figure 1) est situé au sud-ouest du Bassin parisien et couvre environ 9 000 km². Il se développe dans un ensemble de formations lacustres à dominante calcaire qui se sont déposées durant le Tertiaire (figure 2a), depuis l'Éocène (calcaires de Morancez) jusqu'à l'Aquitainien (calcaires de Pithiviers). Le substratum de l'aquifère est constitué par des formations détritiques du Sparnacien et la formation dite à Argiles à silex, qui recouvrent la craie du Séno-Turonien. La série lacus-

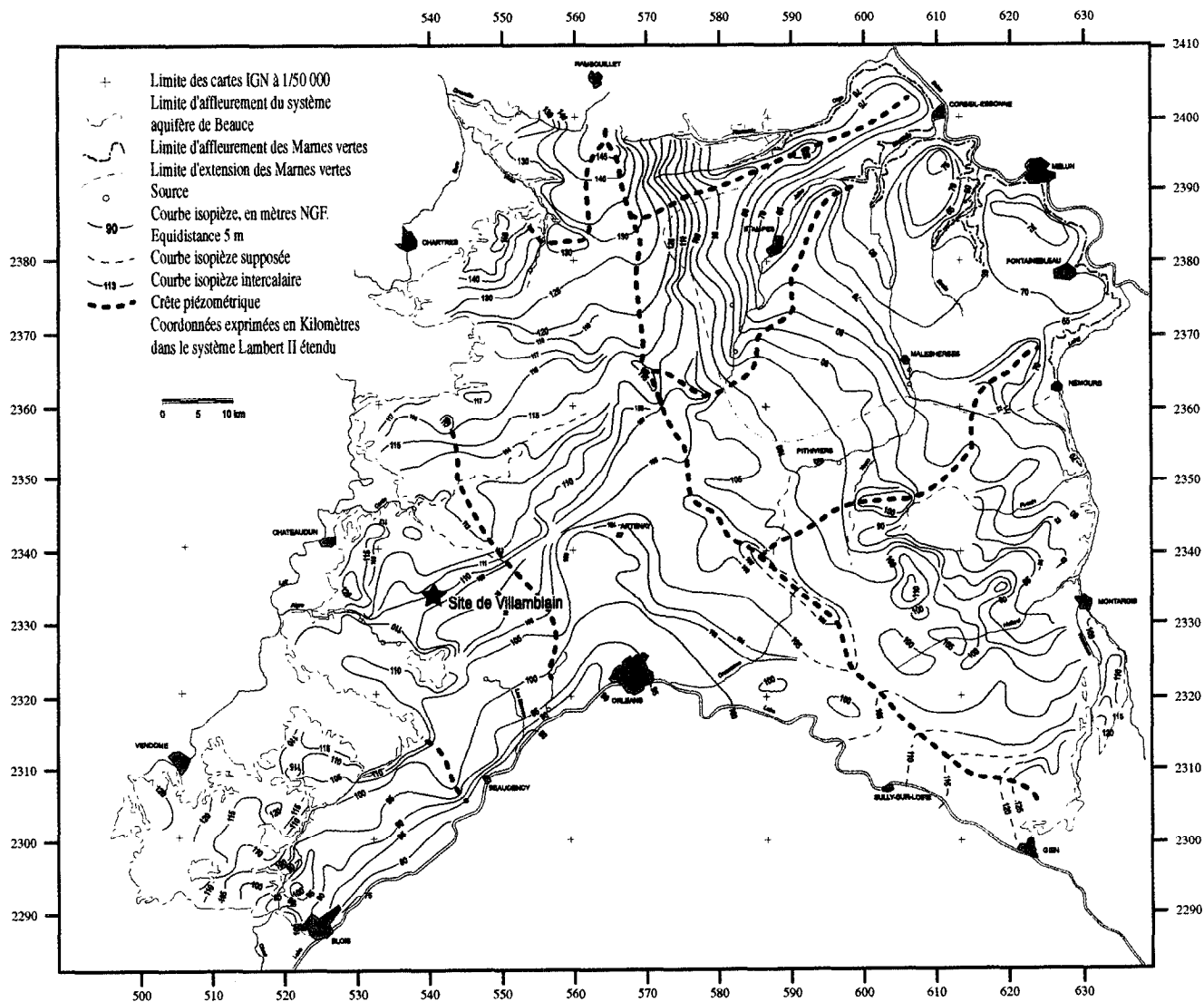


Figure 1. Délimitation du système aquifère de Beauce, piézométrie en 1994 (basses eaux) et localisation du site d'étude de Villamblain (d'après BRGM, 1995).

Delimitation of the Beauce aquifer system, water table in 1994 (low levels) and location of the Villamblain study area (after BRGM, 1995).

tre, qui peut atteindre 190 m de puissance, suit les ondulations NW-SE (direction armoricaine) du substratum. Les cartes piézométriques mettent en évidence l'existence de deux principaux bassins versants souterrains (Desprez et Mégny, 1975 ; BRGM, 1995) : le bassin de la Seine, au nord-est de l'aquifère, et le bassin de la Loire, au sud-ouest. Les directions d'écoulement sont respectivement SW-NE et NW-SE, avec un très faible gradient hydraulique régional (de l'ordre de 0,1 %).

3. Le site étudié

Le site de Villamblain (figure 1), d'une superficie de 7 km², est situé au sud-ouest de l'aquifère, dans la partie occidentale du bassin versant souterrain de la Loire. L'épaisseur des argiles à silex qui constituent le substratum de l'aquifère est comprise entre 15 et 25 m ; celle de la série lacustre est voisine de 60 m (Schnebelen et al., 1996). La série lacustre (figure 2b) débute, soit par les calcaires marneux du Lutétien (calcaires de Morancez), qui peuvent atteindre une dizaine de mètres et qui supportent 5 à 30 m de calcaires du Stampien supérieur (calcaires d'Étampes), soit directement par les calcaires du Stampien. Viennent ensuite des couches de marnes sableuses attribuées à la molasse du Gâtinais (Aquitainien inférieur), dont l'épaisseur est voisine de 5 m. Sur la zone d'étude, la série lacustre se termine par les calcaires fissurés de l'Aquitainien supérieur (calcaires de Pithiviers), dont l'épaisseur est comprise entre 20 et 30 m. Les calcaires de Pithiviers sont recouverts par une couverture pédologique peu épaisse (King et al., 1999) et très perméable (Ould Mohamed et al., 1997).

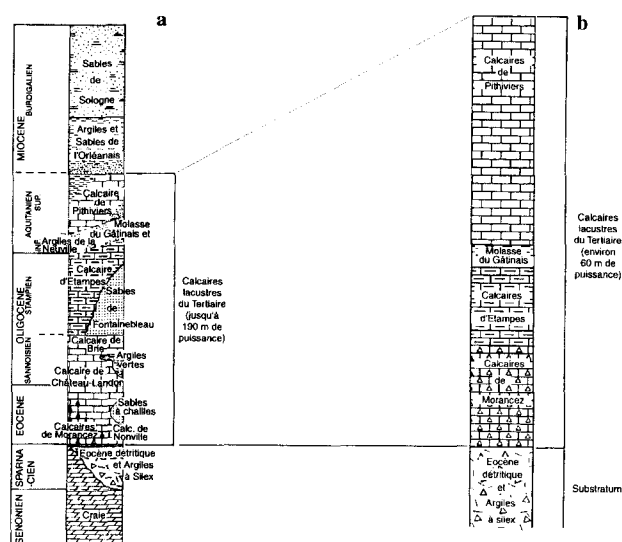


Figure 2. Colonne lithostratigraphique du système de Beauce. a : ensemble des formations (d'après Desprez et Mégny, 1975) ; b : formations présentes au droit du site d'étude.

Lithostratigraphic column of the Beauce system. a : whole formations (after Desprez and Mégny, 1975) ; b : formations present beneath the study area.

La nappe est libre et le niveau piézométrique est situé entre 12 et 20 m de profondeur. La transmissivité est de 5.10^{-2} à $10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et le coefficient d'emmagasinement est compris entre 7 et 13 % (Gigot, 1973). La lame d'eau infiltrée est en moyenne de 110 mm par an sur la période 1946-1994. De nombreux pompages sont présents sur le site d'étude et sont utilisés pour l'irrigation printanière et estivale dans des forages dont le débit instantané varie de 60 à 270 m³·h⁻¹.

4. Les mesures réalisées dans les forages

Des profils thermiques, des profils de vitesses d'écoulement et des prélèvements d'échantillons d'eau à différentes profondeurs ont été effectués à différentes périodes dans 8 forages agricoles. Ces forages captent toute la hauteur de l'aquifère et permettent ainsi une étude détaillée de l'évolution de la qualité de l'eau avec la profondeur. Nous présentons les résultats obtenus dans deux forages F1 (X = 543,68 km ; Y = 2 335,90 km) et F2 (X = 546,16 km ; Y = 2 335,28 km), qui permettent de mettre en évidence un comportement typique, représentatif des variations observées verticalement et latéralement dans l'aquifère.

Les profils de températures de l'eau dans un forage permettent, par l'analyse des perturbations du gradient de température, de localiser les arrivées et les pertes d'eau en fonction de la profondeur et renseignent, par conséquent, sur les propriétés hydrodynamiques verticales de l'aquifère (Jouanna et al., 1993). Ces profils thermiques ont été réalisés à l'aide d'une sonde piézo-température dont la résolution est le centième de degré. La température a été mesurée par paliers descendants et remontants, tous les 0,5 ou 1 m, sur toute la colonne d'eau de chaque forage.

Les profils de débits ont été réalisés à l'aide d'un micro-moulinet à cellule photoélectrique. Cet appareil permet de mesurer des vitesses de courants verticaux, ascendants ou descendants, à l'intérieur d'un forage et de déterminer ainsi les zones de production ou de pertes (Xiang, 1995).

Trois campagnes de mesure ont été réalisées :

- une campagne de juin à septembre 1996, pendant la période d'irrigation estivale, lorsque les forages sont en cours de pompage ;
- deux autres campagnes, l'une à l'hiver 1996, l'autre en mars 1997, alors que les pompages agricoles étaient arrêtés.

Après avoir localisé les arrivées d'eau à l'aide des profils thermiques et des profils de vitesses d'écoulement, des prélèvements ont été effectués en face de chaque arrivée, afin d'en déterminer les caractéristiques physico-chimiques. L'analyse des espèces chimiques majeures a été effectuée par chromatographie en phase liquide.

5. Résultats et discussion

5.1. Mise en évidence d'une stratification hydrogéochimique

Le forage F1 a une profondeur de 55 m et il est crépiné à partir de 19 m. Il capte donc l'ensemble de la série lacustre (*figure 3a*), des calcaires de Pithiviers aux calcaires de Morancez inclus. Pendant la période d'irrigation, les écoulements dans le forage (*figure 3b*) sont descendants au-dessus de la crépine du groupe électropompe, qui est située à 30 m de profondeur, et ascendants au-dessous de celle-ci. Six arrivées d'eau, matérialisées par des zones où le débit augmente (*figure 3c*) et où le gradient de température varie (*figure 3b*), ont été mises en évidence. Ainsi, deux arrivées d'eau, notées 1 et 2 sur la *figure 3b*, ont été repérées à la hauteur des calcaires de Pithiviers, trois à la hauteur des calcaires d'Étampes (arrivées 3, 4 et 5) et une à la hauteur des calcaires de Morancez (notée 6).

Les prélèvements (*figures 3d et 3e*) révèlent que les eaux issues des calcaires de Pithiviers possèdent, pour ce forage, des teneurs en NO_3^- et en Cl^- élevées : $79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de NO_3^- et $35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de Cl^- pour l'arrivée d'eau notée 1 et $85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de NO_3^- et $36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de Cl^- pour le mélange des arrivées d'eau 1 et 2. En revanche, les teneurs en NO_3^- et en Cl^- sont moins élevées pour les arrivées d'eau situées à la hauteur des calcaires d'Étampes et des calcaires de Morancez : voisines de $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ pour NO_3^- et de $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ pour Cl^- . L'échantillon prélevé à la base des calcaires de Morancez (53 m) présente une teneur en NO_3^- de $39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, alors que la teneur en Cl^- reste in-

changée. Les dosages d'autres éléments chimiques effectués sur cet échantillon (*tableau 1*) montrent que cette eau est plus ancienne (traces de fluor) et plus réductrice (présence de nitrites), même si la teneur en NO_3^- reste élevée. Il s'agit là sans doute d'un horizon peu productif des calcaires de Morancez.

Par conséquent, ces mesures révèlent une importante stratification hydrogéochimique : la partie supérieure de l'aquifère (calcaires de Pithiviers) possède des teneurs en NO_3^- et en Cl^- presque 2 fois supérieures à celles observées dans la partie inférieure (calcaires d'Étampes et calcaires de Morancez). Cette stratification hydrogéochimique existe aussi, mais de façon moins marquée, pour d'autres éléments chimiques tels que Na^+ , K^+ et Ca^{2+} (*tableau 1*). Ces résultats révèlent aussi une forte diminution des teneurs en NO_3^- et en Cl^- au passage de la molasse du Gâtinais. Celle-ci constituerait en quelque sorte un écran limitant les transferts verticaux et ainsi le mélange des eaux récentes provenant de la surface avec les eaux plus anciennes qui sont présentes en profondeur.

5.2. Présence d'écoulements verticaux

En dehors de la période d'irrigation (décembre 1996 et mars 1997), lorsque le forage est au repos, les profils thermiques obtenus dans le forage F1 (*figure 3b*) sont, pour la partie inférieure de l'aquifère, peu différents de celui réalisé en juin 1996 ; on remarque les mêmes variations du gradient thermique, témoins d'arrivées d'eau. En revanche, pour la partie supérieure de l'aquifère, les profils thermiques sont décalés vers des températures plus élevées et présentent un aspect uniforme autour de la valeur $12,20^\circ\text{C}$.

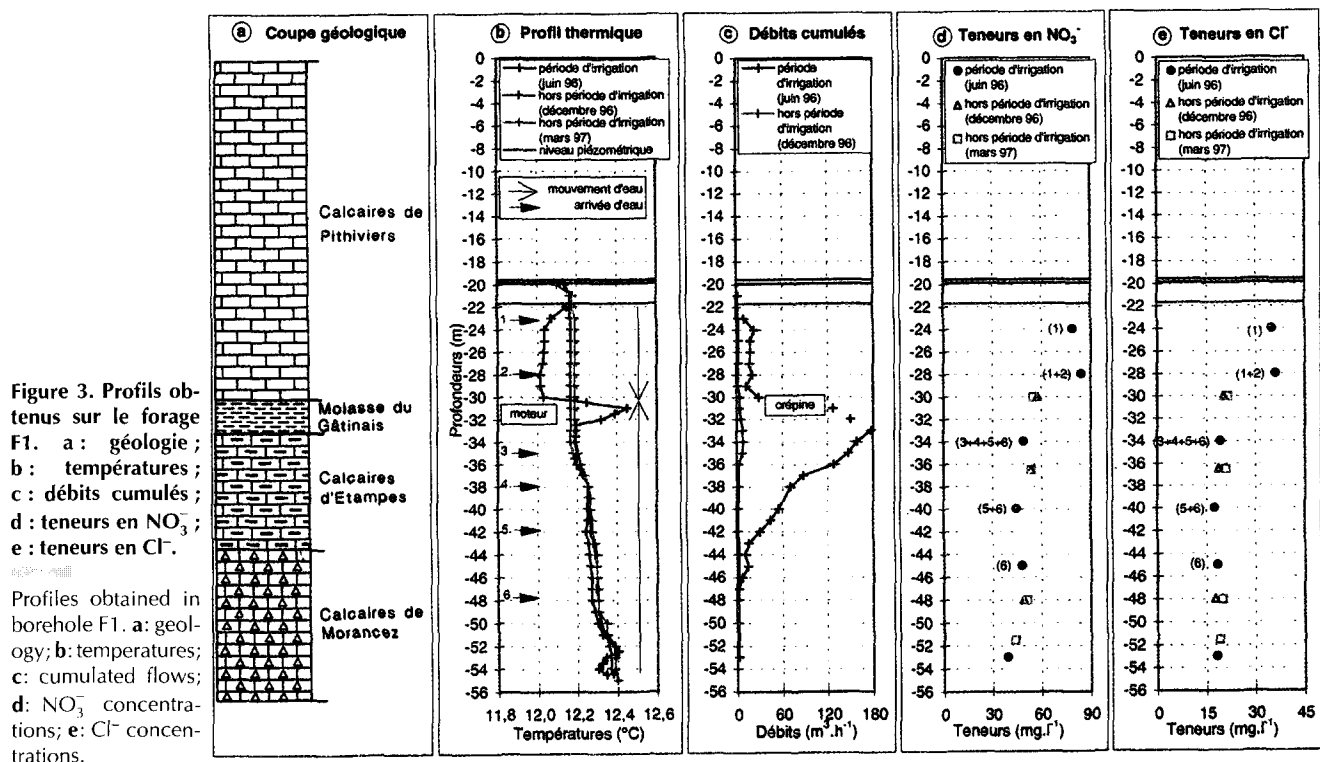


Tableau 1. Analyses chimiques des échantillons d'eaux prélevés dans le forage F1 (PI : période d'irrigation ; HPI : hors période d'irrigation ; profondeur en m ; concentrations en mg·L⁻¹).

Chemical analyses of the water samples collected in borehole F1 (PI: irrigation period; HPI: outwith irrigation period; depth in m; concentrations in mg·L⁻¹).

		Profondeurs				Concentrations																	
						Na ⁺		K ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺		HCO ₃ ⁻		F ⁻		Cl ⁻		NO ₃ ⁻		NO ₂ ⁻	
		PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI
Calcaires de Pithiviers	- 24			8,0		2,9		4,6		106		207		0,2		35		79		0,0		5,5	
	- 28			7,6		2,0		4,5		108		210		0,1		36		85		0,0		5,1	
Molasse du Gâtinais		- 30		5,6		1,5		4,8		89		227		0,0		22		55		0,0		3,8	
Calcaires d'Étampes	- 34	- 4,7	5,7	5,3	1,5	1,4	4,1	4,7	93	87	210	231	0,1	0,0	19	21	49	54	0,0	0,0	5,1	3,8	
	- 40		5,7		1,5		4,0		92		205		0,1		18		45		0,0		4,7		
Calcaires de Morancez	- 45	- 48	5,4	5,2	1,4	1,4	4,1	5,5	92	85	206	228	0,1	0,0	18	20	48	51	0,0	0,0	5,2	5,4	
	- 53	- 52	6,1	5,1	1,6	1,1	7,6	7,2	89	81	216	237	0,2	0,3	18	19	39	44	0,1	0,0	11,2	8,5	

La température de 12,20 °C mesurée à la hauteur des calcaires de Pithiviers correspond en réalité à la température de l'arrivée d'eau située à 35 m de profondeur, au sommet des calcaires d'Étampes (arrivée 3). Ceci s'interprète par le fait que cet horizon des calcaires d'Étampes possède une piézométrie plus élevée, provoquant ainsi une décharge des horizons producteurs du calcaire d'Étampes dans les horizons du calcaire de Pithiviers, qui deviennent absorbants. Ce résultat est corroboré par le profil de débits obtenu au micromoulinet dans le forage au repos. En effet, des vitesses voisines de 1 cm·s⁻¹, correspondant à un débit de 9 m³·h⁻¹, ont été mesurées au micromoulinet entre 35 et 29 m de profondeur, à la hauteur du toit des calcaires d'Étampes et de la molasse du Gâtinais. Cette valeur est confirmée par une expérience de traçage dans le forage, où l'on a observé la vitesse de déplacement vertical d'un pic d'eau salée. D'autre part, on constate que les teneurs en NO₃⁻ et en Cl⁻ des échantillons d'eau prélevés dans la partie supérieure de l'aquifère sont nettement plus faibles en dehors de la période d'irrigation que pendant la période d'irrigation (figures 3d et 3e) : 55 mg·L⁻¹ contre 85 mg·L⁻¹ pour NO₃⁻ et 22 mg·L⁻¹ contre 36 mg·L⁻¹ pour Cl⁻. Les teneurs en NO₃⁻ et en Cl⁻, voisines de 50 mg·L⁻¹ et de 20 mg·L⁻¹ respectivement, correspondent en réalité aux teneurs dans la partie inférieure de l'aquifère. Des teneurs identiques entre la partie supérieure de l'aquifère et la partie inférieure ont également été mesurées en dehors de la période d'irrigation, pour d'autres éléments chimiques (tableau 1).

On a donc mis en évidence, pendant la période d'arrêt des pompes, une circulation ascendante dans le forage. La partie inférieure de l'aquifère (calcaires d'Étampes) est en charge et débite, au travers du forage, dans la partie supérieure (calcaires de Pithiviers). Ceci homogénéise les

teneurs en éléments chimiques (notamment en NO₃⁻ et en Cl⁻) à la valeur correspondant aux horizons profonds.

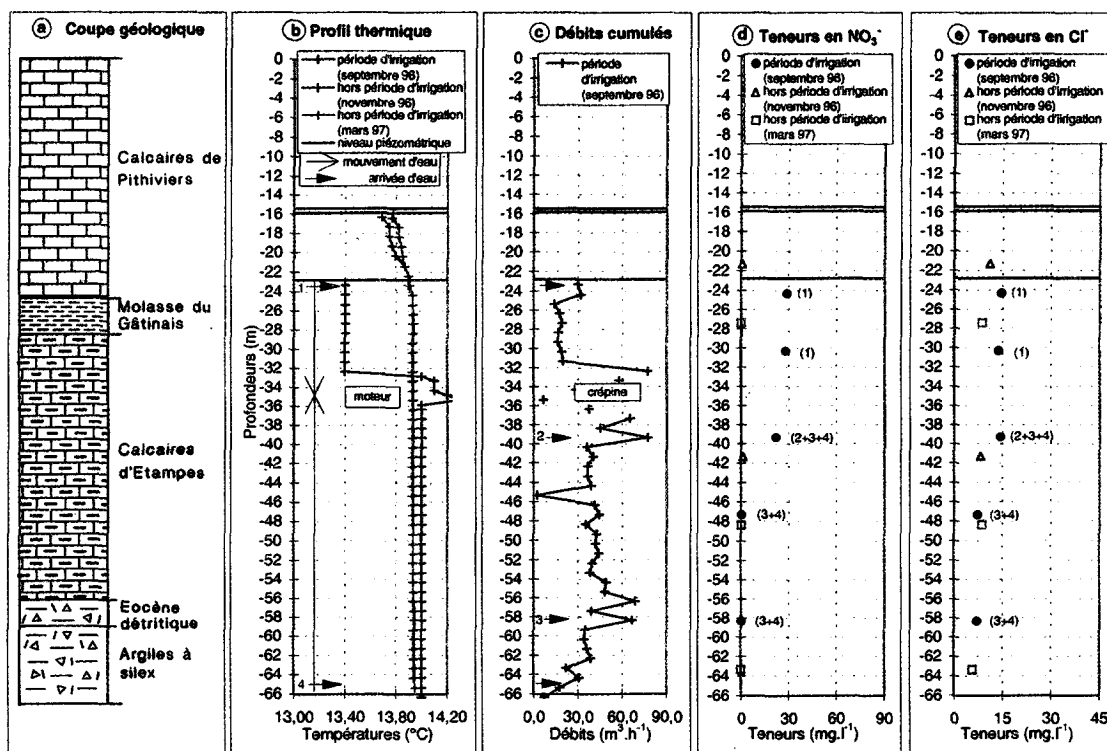
5.3. Appréciation de la variabilité latérale

Le forage F2 est situé à 2,6 km à l'est du forage F1. Sa profondeur est de 66 m et il est crépiné à partir de 21 m. Il capte donc (figure 4a) l'ensemble de la série lacustre, sauf en ce qui concerne les calcaires de Morancez, qui ne sont pas représentés au niveau de ce forage, et une partie du substratum constitué par de l'Éocène détritique et des Argiles à silex, avec une forte teneur en silex. Le profil thermique (figure 4b) et le profil de débits (figure 4c) réalisés pendant la période d'irrigation mettent en évidence 4 arrivées d'eau. Ces arrivées sont situées respectivement à la base des calcaires de Pithiviers (arrivée 1), dans les calcaires d'Étampes (arrivée 2) et à la hauteur de l'Éocène détritique et de la formation dite à argiles à silex (arrivées 3 et 4). Cependant, l'augmentation du débit (figure 4c) est relativement limitée à la hauteur des calcaires d'Étampes, alors qu'elle est beaucoup plus importante à la hauteur du substratum. Les calcaires d'Étampes, connus pour être très productifs (Desprez et Mégnien, 1975), ne le sont pas au niveau de ce forage, car ils sont très marneux, comme le montre la description de la coupe géologique locale. En revanche, la formation du substratum est à l'origine d'une importante arrivée d'eau. Cette dernière serait liée au faciès très caillouteux (teneur élevée en silex) de la formation à cet endroit.

Pour ce qui concerne l'arrivée d'eau issue des calcaires de Pithiviers, les teneurs mesurées pendant la période d'irrigation sont voisines, respectivement, de 30 mg·L⁻¹ pour NO₃⁻ (figure 4d) et de 15 mg·L⁻¹ pour Cl⁻ (figure 4e). En revanche, pour les arrivées d'eau issues de l'Éocène détritique et de la formation dite à argiles à silex, la teneur en NO₃⁻ est inférieure au seuil de détection

Figure 4. Profils obtenus sur le forage F2. a : géologie ; b : températures ; c : débits cumulés ; d : teneurs en NO_3^- ; e : teneurs en Cl^- .

Profiles obtained in borehole F2. a: geology; b: temperatures; c: cumulated flows; d: NO_3^- concentrations; e: Cl^- concentrations.



($5 \cdot 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) et la teneur en Cl^- est de $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Cette diminution des teneurs en NO_3^- s'accompagne d'une baisse des valeurs en oxygène dissous et du potentiel redox, ainsi que d'une augmentation des teneurs en sulfates (tableau II). Ces évolutions sont généralement associées à un processus de réduction naturelle de NO_3^- sur substrats soufrés (Edmunds et Walton, 1983), qui pourraient provenir de la pyrite contenue dans certains dépôts de l'Éocène détritique.

Ainsi, la stratification hydrogéochimique de l'aquifère a également été observée pendant la période d'irrigation au niveau de ce second forage. Cependant, les teneurs en NO_3^- et en Cl^- sont nettement plus faibles que pour le forage F1.

En dehors de la période d'irrigation (novembre 1996 et mars 1997), les profils thermiques (figure 4b) sont uniformes sur toute la hauteur crépinée du forage, soit de 21 à 66 m de profondeur. La température de $13,94^\circ\text{C}$ correspond à la température de l'arrivée d'eau issue de la formation basale (arrivée 4). Les 3 autres arrivées d'eau, mises en évidence, pendant la période d'irrigation, à la hauteur de l'Éocène détritique, des calcaires d'Étampes et des calcaires de Pithiviers, n'apparaissent plus sur les profils thermiques. L'horizon producteur de la formation basale est donc en charge et débite dans les couches supérieures. Les teneurs en NO_3^- et en Cl^- mesurées en dehors de la période d'irrigation (figures 4d et 4e) sont cohérentes avec cette interprétation : toute la colonne d'eau du forage possède les mêmes teneurs en NO_3^- et en Cl^- que l'arrivée d'eau de la formation basale, soit inférieure à $5 \cdot 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ pour NO_3^- et environ $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ pour Cl^- . Il en est de même pour les autres éléments chimiques

analysés, à l'exception des sulfates (tableau II). Un profil au micromoulinet a été réalisé en dehors de la période d'irrigation, mais il n'est pas exploitable, la vitesse de déplacement étant trop faible (inférieure au seuil de rotation de l'hélice, soit $0,4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). Une expérience de traçage donne, en revanche, un débit de percolation verticale de $9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Comme pour le forage F1, une circulation locale ascendante existe, en dehors de la période d'irrigation, dans ce second forage. Toutefois, ce ne sont pas les calcaires d'Étampes qui présentent ici la charge la plus élevée, mais une nappe localisée dans un horizon plus profond.

6. Conclusion

Les résultats présentés dans cette note révèlent une importante stratification hydrogéochimique de l'aquifère des calcaires de Beauce, ainsi qu'une forte variabilité spatiale et temporelle de cette stratification.

La stratification hydrogéochimique est en premier lieu expliquée par la structure et la lithologie des formations géologiques dans lesquelles l'aquifère se développe. Elle est particulièrement nette pour les aquifères qui comportent, comme l'aquifère des calcaires de Beauce, une partie supérieure libre, un niveau semi-perméable et une partie inférieure semi-captive.

Dans de tels aquifères, la composition hydrogéochimique de la partie supérieure libre dépend directement de la composition des écoulements verticaux *per descensum*, qui participent à la recharge de l'aquifère et dont la composition est largement influencée par les activités agricoles. C'est notamment le cas des anions NO_3^- et Cl^- .

Tableau II. Analyses chimiques des échantillons d'eaux prélevés dans le forage F2 (PI : période d'irrigation ; HPI : hors période d'irrigation ; profondeur en m ; concentrations en mg·L⁻¹).

	Profondeurs				Concentrations																	
			Na ⁺		K ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺		HCO ₃ ⁻		F ⁺		Cl ⁺		NO ₃ ⁻		NO ₂ ⁻		SO ₄ ²⁻	
	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI	PI	HPI
Molasse du Gâtinais	- 24	- 27	6,8	4,7	1,8	1,5	10,5	12,6	90	72	228	254	0,2	0,4	14,7	8,7	29	0	0,0	0,0	17	33
Calcaires d'Étampes	- 30		6,7		1,9		10,7		87		249		0,3		13,8		28		0,0		17	
	- 39		6,0		2,0		14,7		77		245		0,1		14,3		22		0,0		23	
	- 47	- 48	5,7	4,7	1,7	1,5	13,1	12,6	79	71	245	254	0,4	0,4	7,3	8,7	0	0	0,0	0,0	30	33
Argiles à silex	- 58	- 63	6,0	4,9	2,0	1,5	13,3	12,6	80	73	244	246	0,4	0,3	7,1	5,8	0	0	0,0	0,0	30	20

En profondeur, des niveaux réducteurs peuvent aussi être présents localement. Ils sont alors aussi à l'origine de variations de composition hydrogéochimique, et sont en particulier responsables d'une diminution de la concentration en NO₃⁻.

Cependant, l'exploitation d'un tel aquifère multicouche induit verticalement des différences de charges hydrauliques. Il en résulte alors des écoulements rapides dans les forages, qui varient dans le temps selon le régime de production des puits et peuvent être à l'origine d'une inversion du profil de concentration des anions NO₃⁻ et Cl⁻. En période de pompage, le mélange d'eau provenant des différents horizons producteurs conduit à des teneurs en éléments chimiques en sortie de forage qui sont les moyennes des teneurs dans les différents horizons, pondé-

rées par les débits de ces horizons. Lorsque le forage est au repos, il se produit en général un écoulement ascendant qui entraîne une homogénéisation des teneurs à la valeur des horizons profonds. Des observations analogues ont été réalisées par Avci (1994) et Lacombe et al. (1995).

De manière plus générale, les résultats présentés dans cette note montrent que la composition hydrogéochimique d'une eau issue d'un système aquifère comme celui de Beauce ne peut en aucun cas être interprétée sans connaissance préalable du fonctionnement du système aquifère et de son régime de production tout au long de l'année. C'est en effet ainsi qu'il sera possible de replacer les données hydrogéochimiques dans leur contexte spatial et temporel, ainsi que d'en tirer toutes les conséquences en matière de qualité de l'eau.

Remerciements. Cette étude a été effectuée dans le cadre du contrat de recherche « Villamblain-Modélisation », dont le financement a été assuré par l'Agence de l'eau Loire-Bretagne et la région Centre. Nous tenons à remercier ces partenaires, ainsi que les propriétaires des forages agricoles.

7. Références

- Avci C.B. 1994. Evaluation of flow leakage through abandoned wells and boreholes, *Water Resour. Res.*, 9, 2565-2578
- BRGM, 1995. *Piézométrie du système aquifère de Beauce – Basses eaux 1994*, Rapport BRGM R38572, 33 p.
- Chéverry C. 1998. *Agriculture intensive et qualité des eaux*, Éditions Inra, Versailles, 297 p.
- Edmunds W.M. et Walton N.R.G. 1983. The Lincolnshire limestone : hydrogeochemical evolution over a ten-year period. Process in karst hydrogeology. Stringfield Memorial Volume, *J. Hydrol.*, 61, 201-211
- Desprez N. et Mégnien C. 1975. *Atlas hydrogéologique de la Beauce*, BRGM, Service géologique régional du bassin de Paris, Orléans, 112 p.
- Gigot C. 1973. *Notice explicative de la carte géologique de la France au 1/50 000*, feuille 362, Patay (21-19)
- Jouanna P. et al. 1993. A summary of field test methods in fractured rocks, in : Bear J., Marsily G. de, Tsang C.F. (éds), *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*, Academic Press, Orlando, 560 p.
- King D., Bourennane H., Isambert M. et Macaire J.-J. 1999. Relationship of the presence of a non-calcareous clay-loam horizon to DEM attributes in a gently sloping area, *Geoderma*, 89, 95-111
- Lacombe S., Sudicky E.A., Frapet S.K. et Unger A.J.A. 1995. Influence of leaky borehole on cross-formational groundwater flow and contaminant transport, *Water Resour. Res.*, 8, 1871-1882
- Ould Mohamed S., Bruand A., Bertuzzi P., Bruckler L., Guillet B. et Raison L. 1997. Estimating long-term drainage at a regional scale using a deterministic model, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 1473-1482
- Pulido-Bosch A., Andreu J.M., Estevez A. et Ayanz J. 1998. Zonation hydrogéochimique verticale dans l'aquifère karstique du Cid (Alicante, Espagne), *C. R. Acad. Sci. Paris*, 326, série IIa, 421-426
- Schnebelen N., Ledoux E., Bruand A., Darhout R., Creuzot G., Verbeque B. et Courtemanche P. 1996. The experimental site of Villamblain : an example of an action programme to reduce the nitrogenous diffused pollution of the Beauce calcareous aquifer, in : *The use of pedotransfer in soil hydrology research in Europe*, Proc. II workshop, Inra, Orléans (France), 10-12/10/1996, 151-158
- Xiang J. 1995. The evaluation of the flowmeter test in three-layer aquifers and the influence of disturbed zones, *J. Hydrol.*, 166 (1-2), 127-145